台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 75(1):73–85 (2026)
https://doi.org/10.6156/JTAR.202603_75(1).0004

專題論述

農用無人機，農業多元應用之現代化工具及未來展望

陳怡菁[1] 楊純明[2,*]

摘要

陳怡菁、楊純明。2026。農用無人機，農業多元應用之現代化工具及未來展望。台灣農業研究 75(1):73–85。

農耕觀念的更新與科技的進步，帶動了農業經營管理的精進與創新，從糧食生產、農產品行銷、直至農業環境保護及生態維護的思維與作法皆隨著時代脈動往前進步，期望人類能夠過著豐衣足食的幸福生活，也讓人生活出亮麗的生命色彩。農用無人機在此時橫空出世，不僅走在當前農業的產業前沿，更成為未來農業蓬勃發展的空中人工智慧助手，從單一作業機具進化為農業資訊/數據平台、逆境/災害偵 (監) 測耳目、防疫防災救援樞紐、乃至於農業淨零與碳管理的多功能工具。臺灣農用無人機在農耕體系上的引用與利用，逐漸從早期稻作栽培的噴藥施肥朝向多元的應用方向，希望未來可以結合各種感測裝置、先進科技、人工智慧、物聯網及客製化作業系統等元素，廣泛應用於進一步提升農糧生產的質量、農業經營管理的效能及應對氣候變遷與農業淨零的利器，提供數據化、多目標、高效益及低風險的多特色解決方案，貢獻於農業永續願景的實現。本文整合相關訊息與情境，描述了農用無人機的優勢與挑戰，寄望農業從業人員高瞻遠矚洞察機會所在，農業利害關係人找出產業發展利基，通力合作互利共贏迎向農業的新紀元。

關鍵詞：無人機、農用無人機、農業領域應用、精準農業、智慧農業。

前言

無人機 (drones) 或稱無人飛機、無人飛行載具 (unmanned aerial vehicles; UAVs)、無人飛行器系統 (unmanned aircraft systems; UASs)，係指無需人員直接駕駛而可由遠端或自動控制系統操控的飛行器。無人機通常由包含機體結構/飛行平台 (如固定翼飛機、單或雙旋翼直升機、多旋翼及混合型設計等)、遙控系統 (如遠端操作、預設航線及人工智慧 (artificial intelligence; AI) 自主飛行等)、動力飛行系統 (如電動馬達、燃油引擎、油電混合及太陽能等)、通訊導航設備 (如全球定位系統 (global positioning system; GPS) 與慣性導航儀等) 及感測裝置 (如可見光 (red-green-blue; RGB)、多光譜 (multispectral)、高光譜 (hyperspectral)、雷達 (radar)、光學雷達 (簡稱光達，light detection and ranging; LiDAR)、熱紅外線影像儀 (簡稱熱像儀，thermal infrared imager) 及超音波 (ultrasonic) 等) 等組構而成，牽涉續航力、載重力、偵測力、酬載容量、噪音、環保、維護及成本 (Zhang & Kovacs 2012; Esposito *et al*. 2021; Krishna 2021; Velusamy *et al*. 2022; Zhang *et al*. 2022; Guebsi *et al*. 2024)。

大致上，無人機依照研發目的或使用需求而有不同的外型、功能及規格設計，安裝特定的系統，亦隨著科技的發展在飛航距離、飛行控制、起飛海拔、資料傳輸及任務酬載上進步神速。以偵察/監測/勘查功能來說，諸如鏡頭數量、感光元件、像素、幀率 (畫面更新頻率，frame per second; fps)、高倍解析度、焦距及拍照與錄影等規格在近年皆有非常大的精進。如今，像素數目已提升至以億為單位，幀率已增至 100 fps 以上，相片/影片解析度高達 4K

投稿日期：2025 年 7 月 4 日；接受日期：2025 年 11 月 27 日。
* 通訊作者：cmyang0616@gmail.com
[1] 農業部農業試驗所作物組計畫助理。臺灣 臺中市。
[2] 農業部農業試驗所作物組前研究員兼組長。臺灣 臺中市。

或甚至 8K 超高清品質，空拍靈活度可達 360° 水平旋轉與 70° 以上仰角，幾乎可全天拍攝、全向避障及自主剎車等，具有相當高的飛行安全性。

一般來說，無人機使用遙控、導引或自動駕駛系統來控制飛行，利用內建或外掛的感測裝置及資通訊系統來偵察/監測/勘查地景地物地形，也可搭載置物箱/櫃/桶/架進行特殊用途酬載，如科學研究、勘災救援、軍事打擊、能源採礦、物流運輸、地理測繪、建設建築、商務活動、休閒娛樂及農業植保等不同用途。隨著科技的不斷創新與功能的更新，精密高階的無人機可以從事各種的航空太空任務，或裝配了攻擊性武器成為無人戰鬥航太載具 (unmanned combat air vehicle; UCAV)、無人作戰飛機 (combat drone or war drone)，彰顯出了無人機的無限應用潛力。尤其近年來已發展出無人機蜂群 (drone swarms) 態樣，以數十、數百或成千成群的蜂群模式進行集團式的作業，發揮驚人的工作能量與效果。

在農業應用方面，無人機常被稱為農用 (業) 無人機 (agricultural UAV 或 agricultural drone) 或農用植保機，除了基本的飛行、遙控及導航等組件之外，主要結合了感測裝置與資通訊科技、自動化技術、地理資訊系統 (geographic information system; GIS)、GPS 及酬載設備等 (5 大基本組件整理概如圖 1)，

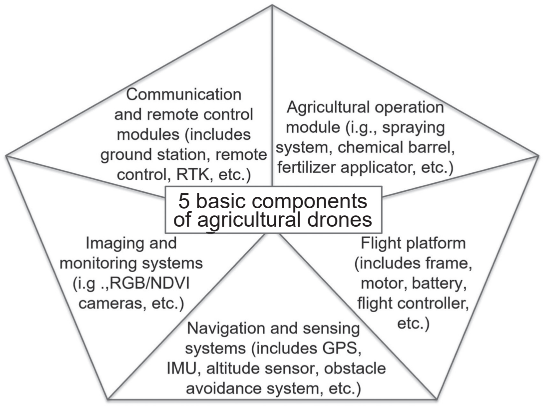

圖 1. 農用無人機之 5 大基本組件。

Fig. 1. The five basic components of agricultural drone.

以從事偵察、監測、勘查、噴灑、施肥及灑播種植等功用，專門於農業管理與生產操作相關的多元應用，據以提升農業經營的效率、精準度及永續性 (Zhang & Kovacs 2012; Yang *et al*. 2022; Zhang *et al*. 2022; Yang *et al*. 2025a, 2025b)。常見 (用) 的農業生產作業酬載模組，一般會具有藥劑箱、肥料桶、水箱或種子盒，液體噴灑系統會有幫浦與噴嘴，粒狀肥料或種子則有螺旋器或離心盤。我國農政部門 (農業部/農糧署) 亦將農用無人機視為屬於『智慧農業設備』之一，根據 2024 年公布的『省工高效及碳匯農機補助實施計畫』，凡具有農保或農業經營相關證明者得以提出農用無人機/農噴無人機補助申請，以減輕農民、農民團體 (如合作社、產銷班) 及農企業等成本負擔，減少因長期農噴帶來病症與意外傷亡，藉此擴大農業生產上之應用。

基本上，申請者須符合以下 4 項補助申請條件：(1) 已取得交通部民用航空局 (以下簡稱民航局) 核發的『遙控無人機高級專業操作證』。(2) 持有農業部動植物防疫檢疫署 (以下簡稱防檢署) 核發的『空中施作技術類別農藥代噴技術人員證書』。(3) 完成『空中施作類別農藥代噴業者』登記。(4) 所屬團體須具備法人資格，並取得民航局核發的『遙控無人機能力審查核准證明』(可進行投擲或噴灑作業與裝載危險物品)。詳細來說，依照民航局《民用航空法》〈遙控無人機專章〉的規定，無人機操作者需要參與防檢署辦理之農藥代噴人員訓練課程及取得證照，再通過民航局無人機操作證的評鑑與證照。施藥作業除了代噴人員需要取得相關證照、事先申請外，3 日內還要上傳施藥紀錄及航跡到防檢署的無人機代噴管理系統。又根據〈遙控無人機專章〉規定，只有具法人與其會員身分才能執行農藥噴灑、空拍及調查等行為，操作前必須向縣市政府申請，且操作者須領有專業操作證才能執行任務。所以，以無人機施灑農藥除了需要符合民航局的飛行安全規定外，施灑農藥的行為也要受到防檢署規範，所有無人機代噴操作者必須同時擁有防檢署之農藥代噴人員專業空中施作證照及領有民航局所發放的無人機高級專業操作證 (G1、G2 等級) 才能合法代噴。

有鑒於農用無人機具備的各種加值應用條件，幾乎可以滿足代噴業者與農民的需要，本文乃特地蒐集與整理有關農用無人機在農業領域應用上的相關訊息/資料，期以提供農業主事者在政策與技術發展上的規劃依據，並作為基層農事操作者 (如農民、青農、產銷班、農場、合作社及農耕管理者) 在實務作業上的利用參考，同時期待科研機構未來在功能與系統整合上有更多的研究開發，使農用無人機無論現在或未來皆成為農業各領域眾多問題的有效解決法寶。

農用無人機之類型、使用效果及操作安全

相較於傳統飛機，農用無人機具有操作成本低、運用彈性大及支援裝備少等特色，目前世界上許多工業發達的國家莫不積極的開發與利用各種用途的機種 (型)。因此，市場上的農用無人機種類甚多，分別在體型、性能、重量酬載、飛行高度、作業時間及飛航距離等有不等規格可供選用。

農用無人機之類型

無人機依機體結構可概分為固定翼無人飛機、無人直升機 (單旋翼或單軸雙旋翼)、無人多旋翼機及混合式或複式無人機 4 種類型，各類型在起降靈活度、作業面積、飛行範圍、續航力、速度及精準度上各具優缺點，因此在應用上需要依照客製化的需求而異。其中，固定翼無人飛機外觀似於單一剛性機翼的小型飛機，主要為了大面積長時間飛行而設計，非常適合繪製與測量大片農田。雖然機動性略遜於多旋翼無人機，其長時間飛行優點適用於繪製、勘查及監測大面積農田，並測繪詳細的正射影像地圖 (orthomosaic maps) 與三維 (three-dimensional; 3D) 地形模型。無人直升機 (單旋翼或多旋翼無人機) 與無人多旋翼機 (具有多個旋翼，通常為 4–8 個)，具有垂直起降與空中懸停功能，由於能耗較高而飛行時間較短、每次飛行覆蓋範圍有限，惟具有機動性較強、穩定性較高、用途較廣及易於操作與部署等優勢。且由於能夠懸停在原地，而適合執行精確的任務 (如目標物詳細檢查、農田局部監測、資材噴灑及針對性用途項目等)。混合式或複式無人機則結合了固定翼與多旋翼的特點，兼具兩種類型無人機的優點與應用選項。但是，組件較為複雜、機身較重及價格較昂貴，也需要更多維護。綜上所知，臺灣農田規劃面積小，固定翼無人飛機不適合應用於農噴作業 (不能懸停)，僅能適用無人直升機 (單旋翼) 與無人多旋翼機 2 種，其中無人直升機因操作技術門檻高及無人多旋翼機操作簡易，因此目前臺灣農噴、施肥及種植多以無人多旋翼機為主。惟目前民航局規定同一人僅能操控 1 架無人機，而無人機蜂群僅能在表演及軍事用途。未來農用無人機除了本身軟硬體的更新進步之外，將整合 AI、物聯網 (internet of things; IoT) 及先進感測系統，實現即時資料處理、決策及自主操作來執行任務，減少對人工干預的需求。

農用無人機之操作安全

農用無人機的作業效率、低勞動強度及高安全性，徹底改變了現在慣行的農耕作業模式。為了提升農用無人機的使用效果與操作安全，需要注意至少 5 項重點，包括：(1) 起飛前、後 360° 檢查，含螺旋槳及電機 (馬達) 是否有裂痕、各螺旋槳旋轉方向性是否正確、機身與酬載是否穩定、機臂是否鎖固、飛控系統、GPS 是否穩定、電池電量、藥桶及全系統 (遙控器與無人機訊號鏈路) 是否正常等；(2) 目標區航線規劃，如利用無人機配備 App 軟體設定航線、施作區塊、飛航高度及飛行速度等；(3) 飛行操作，採用手動或自動飛行，設定起飛、降落、噴灑、避障及地形追蹤等；(4) 安全距離，即機體與作業人員、地面、電線及建物間之距離 (至少 20 m 以上)，田間執行噴藥飛行高度為作物植冠上方 3–4 m；(5) 當時氣象狀況，如風速 (< 2 級)、陣風、降雨、濕度、氣溫及能見度等影響飛行安全與作業品質的因子；(6) 維修保養，可區分飛行前、後檢查、基礎保養、深度保養及年度檢測等 4 大項 (Rejeb *et al*. 2022; Felkers *et al*. 2024; Advexure, https://advexure.com/blogs/news/spray-drones-vs-traditional-crop-spraying-

which-is-more-effective; Investigate Midwest, https://investigatemidwest.org/2025/01/08/as-the-agricultural-drone-industry-takes-off-federal-regulators-struggle-to-keep-up/; Silveus Crop Insurance, https://silveuscropins.com/drones-in-agriculture-the-future-or-over-rated/)。對於基層農事操作者來說，一般可檢查飛控、電池、螺旋槳、GPS、實時動態 (real-time kinematic; RTK)、感測器等功能狀態，清潔機體、處理藥劑與肥料殘留、液體輸送管線及檢視螺絲與鏽蝕等。

農用無人機在當前農業領域上之應用

農用無人機在農業領域上的多元應用，為農業從業人員與農企業提供了提高產量與減少作物損害的新方法，無論在土壤肥力、種子撒播、灌溉、除草、病蟲害防治、糧食產量估測與預測，以及資源與人力節省等項目，皆彰顯出明顯的經濟優勢，乃至於延伸至防減災、勘災及救災等利用 (Olson & Anderson 2021; Yang *et al*. 2022)。自從精準農業 (precision agriculture; PA) 倡議於 1980 年代以來，農用無人機更已成為農業產業的變革者，處於這項大變革的前沿，成為務實的觸媒及有效工具 (Yang *et al*. 2022; Yang *et al*. 2025a, 2025b)。各種配備了先進感測器、相機/攝影機與噴灑系統的農用無人機，使基層農事操作者能夠以高精準度技術來監測、分析及處理目標農作物，讓精準農業的曙光進一步擴散放大 (Primicerio *et al*. 2012; Mulla 2013; Zarco-Tejada *et al*. 2014; Kumar *et al*. 2023)。於是，農耕操作關注的即時作物與土壤健康監測、精準施用農藥與肥料、減少化學品使用與對環境負面衝擊、以及提高作物產量與資源效率等 4 大訴求，得以在農用無人機的協同操作下充分實現。在邁向智慧農業的現在，農用無人機仍然是有力的助手，在感測、偵察、調度及施作的整合扮演樞紐角色 (Hunt & Daughtry 2018; Kumar *et al*. 2023)。

目前在臺灣由於農用無人機相關設備有一定的建置成本，操作使用需要成熟的技巧，操作人員需要具備證照，又有作業飛行空域使用申請規定、農耕目標區破碎地形等之使用限制，因此在農業生產應用上需要選擇較大栽培面積的作物種類以符合成本效益。於是，農用無人機現在大多著重於田間栽培如水稻、玉米及甘藷等大宗糧食作物，或如荔枝、芒果、文旦、柑橘、鳳梨及香蕉等大栽植範圍果樹作物，或如茶樹、甘蔗、香料、藥草、菸草及花卉等經濟作物為主，最近也開始擴及如高麗菜、胡蘿蔔、洋蔥及青花菜等蔬菜類作物。在各項農用無人機的操作型態中，臺灣現行的應用以噴灑液態農藥 (如殺蟲劑、殺菌劑、除草劑及生長調節劑等)、肥料 (如化學肥料、有機肥料及緩釋性肥料等) 最普遍，注重劑量與施作範圍的精準控制，以有效節省成本及提高人員與作物安全。其次，尚有種子的播種/撒佈，如直播水稻、休耕田油菜、田菁等綠肥植物、坡地水土保持多年生草類及果園補播等。某些特定機構、科研單位及政府部門另有其他的應用，如水稻、蔬菜、果園及茶園等之病蟲草害、逆境 (如缺水與缺肥)、或生長與產量判讀等，以及農業氣象有關的災損調查 (如颱風、豪雨及寒潮)、農地的濫墾盜伐、農糧生產計畫、灌溉設計及生產自動化作業路徑規劃等。這些逆境與災害所造成的農作物生產損失，也可以供作農業保險或政府補助的審核依據/佐證，並實現環境、社會及管治 (Environmental, Social and Governance; ESG) 的永續農業政策目標。這些多元用途在未來應用上皆可繼續強化其深度與廣度，增加應用領域，以增進農用無人機在農業各層面上之使用價值。特別在農業持續面臨氣候變遷、資源稀缺、農業淨零及智慧轉型等多項挑戰下，創新又務實的解決方案更顯重要與需要。

農業領域之應用類別

由於農用無人機可以融合農耕 (業) 運作所需的相關技術及現代化科技，因此非但農耕效率與營農效益可以獲得提升，農業的永續性願景也能夠達成，並且透過 AI 數據驅動的解析洞察能力，可讓農耕操作者與管理人員做出合適的決策判斷方案。農用無人機的選擇，通常依照應用方向與目的而有不同的機型與酬載

系統考量，偏向客製化的需求導向。綜合以上，本文謹將其在當前農業領域上之應用概分為 6 大類 (表 1)，並予以依序簡要說明作為使用者利用之參採。

農情監測──農作物偵察、監測及檢測

農情監測的農用無人機常俗稱為『空拍機』或『航拍機』，一般以內建或外掛的相機/攝影機/感測器進行目標農業生產地區的地景地物地形拍攝、記錄，可使用於偵察/監測/檢測農作物生長發育、農作物與土壤即時健康狀況、作物相與面積分布、特殊情境造成地景地物變化等即時或長期改變、資源資材使用、逆境狀態 (如病蟲草害、缺水乾旱、營養缺乏等)，以及後續的變化與變遷追蹤 (Zhang & Kovacs 2012; Yang *et al*. 2025a, 2025b)。這些掛載之 RGB、多光譜、高光譜、熱像儀及 LiDAR 等感測裝置，經由網路通訊直播、顯示、錄影或數位儲存可從事農情監測的酬載作業，作為現況因應分析、判斷及決策的根據，或接續的研析與綜合處理等工作。在當前氣候快速變遷的大環境下，地情與農情變化加大，無需專用起降場地與具高機動性的農用無人機提供了遠距、大面積、快速、即時及自動的監測功能，也可定期巡航建立生產過程的基礎 (本) 農情資訊。如此，取代人力或手動操作，可達到節省時間、勞力及成本的效果，並可迅速取得目標訊息做出及時與即時因應對策，誠為農業從事人員一個有用的農事好夥伴。

表 1. 無人機在當前農業領域上之 6 大應用類別。

Table 1. Six major application categories of drones in the current agricultural field.

Category	Application
1	Agricultural surveillance- Crop scouting, monitoring and testing
2	Precision agriculture and smart agriculture
3	Aerial spraying, seed broadcasting and planting
4	Livestock surveillance and feeding
5	On-site mapping and 3-dimensional modeling
6	Production operations, resource management, and yield estimation and prediction

精準農業與智慧農業

農用無人機有助於繪製農田土壤變異性與農作物活力之時間序列變化圖示，在 GPS 與 GIS 協作及搭配 IoT 無線網路連結大數據 (相關資料庫) 與決策支援系統，可自動或人為指引合適農用機械與農業機器人進行對應之精準與智慧化管理操作，落實特定地點管理 (site-specific management) 精神與精準智慧化境界 (Yang *et al*. 2022; Kumar *et al*. 2023; Agrawal & Arafat 2024; Guebsi *et al*. 2024; Yang *et al*. 2025a, 2025b)。無論係自然環境下發生的病害、蟲害、雜草干擾、高溫或低溫、缺水或淹水、礦物元素不足或過度、毒害物質或重金屬等逆境，或是極端天氣事件的高強度傷害，皆可以農用無人機從事逆境與災損的偵察/監測/勘查，給予適時適地的精準處理，兼顧降低時間、人力、資材的花費成本，又可減少傳統農耕施作人員暴露在藥劑中而提升安全性、提高植保效果。

又從防災救援的角度，前述農情監測的歷史資料與即時偵察結果，除了預警預防之外，也讓農用無人機發揮突發性或臨時性的災情監控、救助、支援、防護等功能。因為農用無人機能有效規避地面障礙、阻撓，快速準確的抵達指定災害發生現場，利用資通訊設備與技術將實情信息回傳處理中心，給予指揮人員做出決策的依據，或直接攜帶相關器材物品至現地達到最快的及時救災救援。在極端天氣發生頻率與強度增加的當下，許多偏遠的受災地區以傳統人力巡檢甚為困難，農用無人機的低成本、強靈活度、高安全性及廣視角等特性，加上受自然環境及地形地物較小影響的彈性，成為最佳的防災救援首選。未來隨著感測技術與輕 (微) 型機型的日益進步，雖然未如露地栽培的廣泛範圍，農用無人機可以延伸擴大在設施農業上的各種應用，如遮陰棚、網室、溫室、垂直農場型設施、植物工廠及智慧型設施等，進行精準智慧化的操作與細部監測。在考量設施高度、架構、作物相及空間配置等條件下，導入最適大小機型以利於航線與任務之規劃，然後以掛載熱像儀或氣體感測器掃描設施內部熱點、氣流分布或濕度差異，串接設施內部微

氣象設備之感測數據，輔助進行設施環控 (如溫差、濕差、風差) 之監測、分布評估及調節。

空中噴灑與播撒/種植

利用附掛裝載農藥、肥料、水箱甚至於種子之農用無人機，可在空中噴灑殺蟲劑、殺菌劑、除草劑及生長調節劑等農藥從事田間生產管理，或播撒肥料、水、種子等調節農作物生長資材投入，快速而有效地做出情境處理，尤其適用於曳引機或灌溉無法到達的地區 (Marzuki *et al*. 2021; Yang *et al*. 2022; Kumar *et al*. 2023; Wang *et al*. 2023; Kumar & Sriram 2024; Agricultural Chemicals Research Institute, https://www.acri.gov.tw/Uploads/Item/9525e5d2-4a15-4439-80ca-813c062d8786.pdf; Yang *et al*. 2025a)。對於農田的灌溉決策，除了掛載之多光譜、高光譜、LiDAR 及超音波等感測器所得知的數據之外，可綜合熱像儀偵測土壤及植體間之熱溫變化與差異，予以即時辨識缺水區域並解決灌溉問題。又配合先進微霧噴嘴的開發使用，精確控制每一滴液滴的大小與噴霧模式，附掛於農用無人機依照特定需求客製化的液滴噴灑方案，可以精細霧化提高覆蓋率、以各種液滴尺寸調整適應不同應用、以合適噴霧模式予適用不同作物類型與生長階段，或以自動化精準控制來減少漂移與脫靶現象，從而提高噴灑效果及最大限度地減少了浪費與對環境的影響。而利用新近開發之特殊農用無人機，可將種子莢直接投擲於土壤，特別是在重新造林、災後重建或覆蓋作物的情況下，將可有效的執行農田與林區播種或補植工作。

牲畜監測與豢 (飼) 養

以農用無人機偵察/監測大面積牧場，尤其是偏遠地區的牧場，將可協助識別動物的活動與分布、水源的供應與可用性，以及潛在的災害威脅等，大大提升牧場建置規劃及營運管理成效。對於開放性大片牧場，牧草的生長與分布不一，透過農用無人機的定期巡航監測提供的感測數據，可應用於實施牧草栽植與管理及豢養牲畜的移動路線調整，助益於放牧型牲畜豢養的效果 (Andrew *et al*. 2019; Burke *et al*. 2019; Alanezi *et al*. 2022; Chou & Huang 2025)。

現場測繪與三維建模

利用農用無人機掛載之感應器 (如 RGB、LiDAR、多光譜、雷達及超音波) 產生之正射影像圖、等高線圖 (contour maps) 及數位高程模型 (digital elevation models; DEMs) 等圖資，可使用於土壤測繪、土地整平、灌排水規劃、場地設計及進出物流等各種用途 (Aasen *et al*. 2015; Tripicchio *et al*. 2015; Milella *et al*. 2019; Potena *et al*. 2019; Liu *et al*. 2024)。除了可大幅縮短傳統人力的工作時間與增進時效，農用無人機鏡頭抓取的數據呈現出的實地、實時、實景等圖像通常更為精確、客觀、使用靈活，並可以 GIS 堆疊多重信 (訊) 息，能滿足不同調查與測繪的需求。例如，將不同感測數據建立田區 2D 或 3D 地景圖、地形圖，呈現所偵測病害、蟲害、雜草、缺水、淹水，或營養不良等造成的異常情形，可輔助精準農業及智慧農業的決策，進行區塊耕犁、施肥、噴藥、除草、灌溉或其他因應作業，將可獲得精準智慧化的管理績效。

生產作業、資源管理及產量估測與預測

藉由無人機建立的歷史數據與即時圖資、天氣模式及當前作物與土壤健康狀況，可協助進行定期或特定的田間環境/狀況調查、地理測繪及生產評估 (Lelong *et al*. 2008; Zhang & Kovacs 2012; Bendig *et al*. 2014; Sankaran *et al*. 2015; Holman *et al*. 2016) 任務。這些無論是土壤、水源、農作物、雜草、病蟲害、災情，或地形地物地景等數據，可接續其他如科研、勘災、搶險、精準智慧化農耕操作及資源管理 (如土壤、水源、資材等) 等具體應用。尤其在需要繁複程序的農糧生產作業，以農用無人機取得諸般數據結合 IoT 的大數據與決策系統，將可游刃有餘的落實於從耕地、播種、施肥、噴藥、生長追蹤、直至生產估測與預測等環節，乃至於採收後的物流運輸。此外，從農作物成熟度與健康狀況的數據評估與追蹤，可確定最佳收穫物採收時間，以確保最佳的品質與產量 (Yang *et al*. 2025b)。也可有效地安排勞動力與設備、減少農機作業停機時間及成本花費，進而提高了農耕獲利能力。這些數據若進入模式分析來估測與預測當季的生產質量，將

可提前進行糧食供需評估、產業輔導及政策措施布局，提升了農業施政的效能與效益。而相對於傳統物流方式，利用農用無人機來空運，更具有避免交通堵塞、規避危險地形及快捷高效安全運輸等明顯優勢。尤其在山區或偏遠地區，農用無人機的物流運輸將可節省更多時間與成本，減少對有限人力資源的依賴。

總之，農用無人機在以上 6 大類農業領域上的應用，將可裝備農業從業人員成為善用現代科技的『新時代農民』，並賦予農村社區成為大有能力的『高效率高獲利新農村』。農用無人機相關技術創造出的顯著經濟影響是難以想像的，其與農業的融合不僅僅是一項技術進步，也是農村與農企業大發展的經濟催化劑。這些經濟貢獻，包括了提高農業生產力、節省肥料及農藥投入成本、技術服務提供新收入來源、投資農村基礎設施以支援農用無人機相關技術精進，以及整體活動所產生連鎖反應，預料將可振興農村社區的經濟成長。因此，可以預期必將給農業帶來深遠又厚重的影響，不但解決長期存在的農業生產挑戰，亦創造新的農業產銷鏈與在農業領域上的就業機會，更將吸引年輕世代從事農業、增強農產品在全球市場的競爭力，使農業真正成為可實踐、有利潤及永續的農產業綜合生態系統。

農業領域之應用挑戰

儘管如此，當前農用無人機的應用仍存在一些技術與實務挑戰，有待各方予以克服，如高初始成本、複雜技術、操作人員熟練程度及飛航與空域限制等，也受到強風暴雨等極端天氣的飛行阻礙。再者，由於電池壽命與有效載荷能力有限 (尤其是多旋翼無人機)，限制了無人機運行時間與範圍，且頻繁充電及攜帶重型感測器或大量資材的容量也會降低運作效率。惟在權衡初始投資與長期投資回報 (如減少化學品使用、節約用水、改善農作物與土壤健康等)、環境效益及創新農業實踐的潛力，農用無人機操作確實對整體農業生態產生了積極與正面的美好藍圖。另外，本文特別要強調控管噴施化學品外溢的重要性，對於農田面積狹小的臺灣，噴施化學品如飄溢至非標的區的鄰田將可能造成糾紛與困擾。

因此，未來農政部門如欲促進與推廣農業人工智慧及無人機的整合應用，需要有宏觀遠見及長期的進程規劃，加上有利的政策與經濟誘因，以跨越各方挑戰。尤其在與農民溝通及農業專業人士合作的過程中，仍有需要討論及解決的許多關鍵議題，諸如：(1) 法規的滾動調修與遵守、(2) 空域的劃設與管理、(3) 農場的成本融資與輔導、(4) 操作人員的訓練與技能精進、(5) 資料與作業系統的管理與安全維護，如此才能夠建置出農用無人機技術及產業的發展環境與市場商業模式。政府如何吸引科研機構與農企業的投入意願，以及廣大基層農事操作者的參與，並且減少衍生的資安風險、隱私保護、資料流失、被動失業及環保影響憂慮等問題，也是成功的門檻。這些樣樣事工，都需要農業相關利害關係人 (含政府、科研機構、農企業、非營利組織及基層農事操作者等) 的齊心協力攜手合作以克竟其功。

農用無人機在未來農業領域上之應用方向

在可預見未來，農用無人機將是一個整合多種技術與設備於機身的多功能多元應用的飛行載具，能夠與其他前瞻農業解決方案相結合，包括拼接衛星影像、AI、IoT、農機設備及農業機器人等，來協同執行特定或客製化的例行工作與特殊任務，創造一個全面全新的農場管理系統。舉例而言，當農用無人機資料補充衛星影像後，可實現更精確的農作物與土壤健康評估及灌溉需求，並可從空中監測牲畜群運動、行為、健康狀況及輔助自動識別受傷或生病動物，以及結合機器學習構建氣候智慧型農業 (climate-smart agriculture)。將 AI 演算法的充分利用，可使農用無人機處理收集的數據以進行現況及預測分析，使形成為數據推動型農耕 (data-driven farming)，一方面可以更高的精度預測病蟲害爆發、營養缺乏及生產質量，另方面可進行農作物表型與基因型高通量/育種研究加速育種週期，以及評估農田區塊的生長率、生物量及冠層特徵。串接合適的農機與農業機器人，農用無人機可成為指揮進行設定農耕操作的樞紐，目前民航局無人機法

規規定 1 人僅能操控 1 架，未來法規開放後可以農用無人機蜂群協調噴灑、灌溉及播種，針對性地噴灑農藥與肥料以減少化學物質的使用與環境影響。經由連線 IoT 與感測器網絡，農用無人機可進行特定性的干預與處理，以評估風暴、洪水或乾旱等災害造成的損失而應用於災害與氣候變遷應變、保險及復建 (救)，又在碳農業/農業淨零與永續性監測上發揮功能。當連結區塊鏈技術去中心化，農用無人機感測數據可確保供應鏈的透明度，並將控制與決策從集中式實體 (個人、組織或團體) 轉移到分散式網路來擴大應用 (Huang *et al*. 2009; Zhang & Kovacs 2012; Sankaran *et al*. 2015; Kamilaris & Prenafeta-Boldú 2018; Rahman *et al*. 2018; Lal 2020; Martínez *et al*. 2020; Wang *et al*. 2024)。

這樣整併不同系統組件的綜合作業方法，不僅可以提高農場生產力，而且有助於實現更永續的農業運作模式，有效應對全球氣候變遷與糧食安全的重大挑戰 (AgFunder Network Partners, https://agfundernews.com)。本文綜合以上所述要點，歸納出農業領域的 7 大未來應用方向，摘述如次。

自主協同工作無人機蜂群 (autonomous drone swarms)

未來的農業生產工作，將可以農用無人機蜂群採行分進合擊的集團式協同作業，針對同一工作場域併行執行多項任務 (如偵察、監控及噴灑等)，來提高作業效率；或以責任區劃分方式由農用無人機蜂群依照責任區塊做工，在同一時間共同執行相同的工作項目 (如播種、噴藥、施肥、灌溉、勘災、吊掛及搬運等)，來縮短執行任務所需要的時間及人力 (Virágh *et al*. 2013; Vásárhelyi *et al*. 2014; Floreano & Wood 2015; Zhou *et al*. 2020; Qamar *et al*. 2022; Weber 2024)。掛載各種微型感測器，農用無人機蜂群的定期巡航或臨時拍攝農作物生長情形與土壤狀況，將有助於進行固定或即時作物與土壤健康監測與追蹤，包括在預定場域或難以抵達處所。

支持達成人工智慧決策 (AI-powered decision support)

農用無人機未來可以取得認證 (如 beyond visual line of sight; BVLOS) 被允許在視線以外運作，如美國聯邦航空總署 (Federal Aviation Administration; FAA) 的授權，而且將獲取的資訊整合 AI 進行即時分析與自主決策，迅速地執行任務 (Tripicchio *et al*. 2015)。

與 IoT 及機器人 (robotics) 技術的集成

農用無人機未來可以串接 IoT 廣泛連接相關系統 (如空中與地面感測器、自動曳引機及農業機器人等)，並搭配大數據及決策系統的 AI 演算，使用於運作無縫智慧農場生態系統 (Agrawal & Arafat 2024)。

病蟲害預測與早期干預

農用無人機藉由IoT串接來自多個資訊來源 (如天氣、土壤、歷年模組) 的 AI 及大數據，可進行預測建模與早期病蟲害預警 (Zhang & Kovacs 2012)。例如，透過微型或小型無人機掛載之影像與光譜辨識、熱影像偵測病斑與蟲害熱點等資訊，搭配 AI 模組與機器學習模型進行病蟲害初期偵測，可預測病蟲害爆發時間與農田區塊，預先進行精準農藥噴灑處理，以早期施給對應措施來排除或減輕病蟲害之危害。

協助氣候調適

農用無人機隨著酬載軟硬體的更新精進，未來將在氣候智慧型農業中發揮關鍵作用，可協助管理耐抗逆境農作物生長，並監測不斷變化的農業生態區。也可利用於溫室氣體/二氧化碳監測、生態農藥效率追蹤等用途，成為多功性的永續智能工具 (Tripicchio *et al*. 2015; Sylvester 2018)。

區塊鏈與農作物可追溯性 (blockchain & crop traceability)

利用農用無人機收集可使用於追溯系統的數據，配合 GIS 標記影像與飛行日誌，可提高供應鏈的透明度與區塊鏈的運轉 (Chou & Huang 2025)。同時，未來將可誕生農用無人機

即服務 (drone-as-a-service; DaaS) 的產業鏈，以租賃或共享模式取代農用無人機所有權，由專業服務代替目前大多數的個別實際操作態樣。

自動化相容合規與報告 (automated compliance and reporting)

農用無人機未來可利用於綜整相關資料來自動產生監管合規報告，特別是在圖資測繪、有機產業、進出口或碳信用等農業領域 (Varanasi *et al*. 2022; Ni 2025)。例如，經由即時 3D 測繪模型與監測覆蓋農作物、碳封存/碳匯數據及生物多樣性等碳農業與永續性相關資料，將可從事於認證碳信用額度與永續性指標等工作。又由結合 quick-response code (QR code) 與 bar code 等條碼視覺辨識系統的拍攝，可利用於快速辨識不同苗盤/植株、所在位置及植栽密度與數量等，以及作為自動盤點與記錄及物流管理用途。當配合多時點影像拼接技術，可將長時間記錄累積之高解析圖資變化進行不同時差比對，可釐清設定起訖時間所造成標的物之改變。

總結以上農用無人機未來在農業領域的 7 大應用方向，再度顯示農用無人機不僅提高現代農業運作的效率、精度與永續性，未來再因為融合智慧農業與 AI 的數據分析及自動化特色，必然將會迅速增加其在農業各層面上扮演的角色，並將使得採行農用無人機整合技術的基層農事操作者成為下一世代高競爭力的科技農民 (Sundar *et al*. 2023)。

農業人工智慧 (artificial intelligence in agriculture) 與農用無人機的整合應用

AI 與智慧農業科技的蓬勃發展，除了將促使農用無人機在各項軟硬體的發展一日千里，更得以在農產業上發揮無限寬廣的應用，也漸形成所謂的『農業人工智慧』創新研究與應用方向。本文因此特別就此面向加以闡述，並以補強先前的論述。基本上，農業人工智慧係指以數據為基礎的方式支持與改進傳統農業經營的做法，同時減輕各方挑戰，綜以提高農業的經營創新、營運效率、降低成本及勞動力需求，並提高操作人員的舒適度、滿足需求考量。在農業生產實務上，農業人工智慧為基層農事操作者提供即時農作物洞察解析，藉由 AI 優化資源供需與改善農作物管理來發揮關鍵作用，協助確定哪些區域需要灌溉、施肥及噴藥等處理或其他應對作業。換言之，就是透過 AI 先進的數據分析與機器學習能力，來解析作物與土壤健康狀況、天氣模式與環境狀況，從種植、灌溉、施肥、噴藥、除草至採收提供完整而精確的各樣生產環節決策建議，產生出農作物產量估測 (算) 與預測模型。如此，將可同時增強農作物管理、降低生產成本、維護環境，延伸解決農業、食品、生物及生態系統領域遭遇的各種問題，從而優化生產與營運流程並促進了農業的永續。

所以，農業人工智慧技術在農業生產實務上至少可歸結出 7 大應用潛力，包括：(1) 作物病蟲害檢測、(2) 自動除草系統、(3) 牲畜豢養與健康監測、(4) 作物產量估測與預測分析、(5) 精準灌溉系統、(6) 無人機輔助空中監視及 (7) 農產供應鏈與需求預測。這些應用潛力的內涵一如前述，重點在於透過 AI 技術的數據運算總結出容納各相關面向的最佳因應決策，為農業從事人員提供能夠做出因應的數據驅動決策及邏輯知識，減少農業的生態足跡並適應氣候變遷與資源稀缺帶來的挑戰。相關農業部門則可經由開發農業人工智慧工具的推廣應用，協助基層農事操作者來縮短區域技術差距、提高生產力、減少損失，再輔以智能供應鏈與產銷鏈來提升生產效能與效益，建構有利潤又可持續的永續農業生產體系。

另外，未來將農業人工智慧與農用無人機的融合集成，不僅是產生一種智慧的農耕作業系統，更代表著現代農業實踐的大變革、大進步，也引領通往新農業世紀的大門。配備農業人工智慧的農用無人機在監測農作物表現、增強農作物與土壤健康、優化資源供需利用及改善整體農場管理等方面將具有無與倫比的能力，可進一步發揮精準智慧化的功效，更改變了現代農業的格局，提供了超越單純效率的眾多好處。因此，利用農業人工智慧提供的複雜數據分析、預測模型與即時決策，在作物健康方面將更能精準與精確地解決病蟲草害防治、植體營養與健康檢測，以及資源管理 (如土壤、水源、氣象、資材) 等挑戰，最終實現更有效

率、更佳質量生產、更永續的農業運作體系 (Agrawal & Arafat 2024)。在土壤分析與管理方面，配備農業人工智慧的農用無人機可以創建土壤特性的詳細地圖 (如 pH 值、水分含量及養分水準)，由農田土壤變化情況進行更有針對性與更有效的土壤管理 (如肥料投入、灌溉水量、微生物調理) 及土壤健康監測。必要時，農業人工智慧可以推薦土壤改良或作物輪作策略等措施來維持或提高土壤肥力，評估與確保土壤健康來促進永續利用，或調節灌溉、農藥及肥料的施用，以降低對環境與生態的負面影響。在生物多樣性方面，使用農業人工智慧優化病原菌與害蟲控制及營養管理，可以創造或改善野生動植物物種的生存環境，促進生物多樣性及提高生態系統的復原力，並有助於維護整體良好的農業景觀。

從瞭解適合各種農業任務的不同類型農用無人機到探索提供寶貴數據的複雜感測器技術，各個農業場域可以根據特定需求自訂或選購這些組件，而農業人工智慧與農用無人機的結合更深入地擴大了影響力，產生的協同效應可以使農業經營管理達到前所未有的精確水平。未來藉由簡便易行與高度自動化作業系統，使得所有技術背景的農民經過適度學習即可使用農用無人機，數據管理與分析軟體可以將複雜的數據集轉化為可操作的步驟。而特定應用的功能允許進行有針對性的干預/處理，從播種、病蟲草害防治到精確灌溉等，確保每一寸農田都得到最高效率的管理。

結語

農耕觀念的更新與科技的進步，使得農用無人機成為未來農業的空中 AI 助手，從單一作業機具進化為農業資訊/數據平台、逆境/災害偵 (監) 測耳目、防疫防災救援樞紐、農業淨零碳管理的多功能工具。臺灣農用無人機在農耕體系上的引用與利用，也從早期稻作栽培的噴藥施肥目的逐漸成為各類大面積栽植及經濟作物生產管理的高效率、低風險、數據化及多目標的解決方案。未來結合各種感測裝置、AI 分析及 IoT 整合等元素，農用無人機的廣泛應用可望進一步提升農糧生產的質量、農業經營管理的效能，貢獻於農業永續願景的實現。臺灣農村的高齡化與勞力短缺現象，提供了農用無人機未來更為寬廣應用領域及使用趨勢的契機。透過連結感測網絡、最新行動通訊技術、IoT、AI 大數據資料運算與分析、農耕作業機具及農用機器人等，農用無人機將可以串接智慧農業資訊整合平台 (智慧農業雲) 與尖端科技，打造更高效的精準智慧農耕體系，助益於更環保、更高利潤及更永續的農業發展。

引用文獻

Aasen, H., A. Burkart, A. Bolten, and G. Bareth. 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 108:245–259. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002

Agrawal, J. and M. Y. Arafat. 2024. Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. Drones 8:664. doi:10.3390/drones8110664

Alanezi, M. A., M. S. Shahriar, M. B. Hasan, S. Ahmed, Y. A. Sha'aban, and H. R. E. H. Bouchekara. 2022. Livestock management with unmanned aerial vehicles: A review. IEEE Access 10:45001–45028. doi:10.1109/ACCESS.2022.3168295

Andrew, W., C. Greatwood, and T. Burghardt. 2019. Aerial animal biometrics: Individual Friesian cattle recovery and visual identification via an autonomous UAV with onboard deep inference. p.237–243. *in*: Proceeding of 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). November 3–8, 2019. Macau, China. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ. doi:10.1109/IROS40897.2019.8968555

Bendig, J., A. Bolten, S. Bennertz, J. Broscheit, S. Eichfuss, and G. Bareth. 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. Remote Sens. 6:10395–10412. doi:10.3390/rs61110395

Burke, C., M. Rashman, S. Wich, A. Symons, C. Theron, and S. Longmore. 2019. Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras. Intl. J. Remote Sens. 40:439–467. doi:10.1080/01431161.2018.1558372

Chou, S. F. and C. Y. Huang. 2025. Blockchain-aided UAV delivery networks for enhanced data security and parcels traceability. p.1–5. *in*: Proceeding of IEEE 101st Vehicular Technology Conference

(VTC2025-Spring). June 17–20, 2025. Oslo, Norway. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ. doi:10.1109/VTC2025-Spring65109.2025.11174763

Esposito, M., M. Crimaldi, V. Cirillo, F. Sarghini, and A. Maggio. 2021. Drone and sensor technology for sustainable weed management: A review. Chem. Biol. Technol. Agric. 8:18. doi:10.1186/s40538-021-00217-8

Felkers, E., C. J. Kuster, G. Hamacher, T. Anft, and M. Kohler. 2024. Pesticide exposure of operators during mixing and loading a drone: Towards a stratified exposure assessment. Pest Manag. Sci. doi:10.1002/ps.8574

Floreano, D. and R. J. Wood. 2015. Science, technology and the future of small autonomous drones. Nature 521:460–466. doi:10.1038/nature14542

Guebsi, R., S. Mami, and K. Chokmani. 2024. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. Drones 8:686. doi:10.3390/drones8110686

Holman, F. H., A. B. Riche, A. Michalski, M. Castle, M. J. Wooster, and M. J. Hawkesford. 2016. High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. Remote Sens. 8:1031. doi:10.3390/rs8121031

Huang, Y., W. C. Hoffmann, Y. Lan, W. Wu, and B. K. Fritz. 2009. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform. Appl. Eng. Agric. 25:803–809. doi:10.13031/2013.29229

Hunt, E. R., Jr. and C. S. T. Daughtry. 2018. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? Intl. J. Remote Sens. 39:5345–5376. doi:10.1080/01431161.2017.1410300

Kamilaris, A. and F. X. Prenafeta-Boldú. 2018. Deep learning in agriculture: A survey. Comput. Electron. Agric. 147:70–90. doi:10.1016/j.compag.2018.02.016

Krishna, K. R. 2021. Aerial Robotics in Agriculture: Parafoils, Blimps, Aerostats, and Kites. Apple Academic Press. Palm Bay, FL. 414 pp.

Kumar, S. P., A. Subeesh, B. Jyoti, and C. R. Mehta. 2023. Applications of drones in smart agriculture. p.33–48. *in*: Smart Agriculture for Developing Nations: Status, Perspectives and Challenges. Advanced Technologies and Societal Change. (Pakeerathan, K., ed.) Springer. Singapore. 258 pp. doi:10.1007/978-981-19-8738-0_3

Kumar, H. and A. Sriram. 2024. An overview of drones in agriculture (FS-2024-0705). University of Maryland Extension. https://extension.umd.edu/resource/overview-drones-agriculture-fs-2024-0705/ (visit on 4/20/2025)

Lal, R. 2020. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. Soil Sci. Plant Nutr. 66:1–9. doi:10.1080/00380768.2020.1718548

Lelong, C. C. D., P. Burger, G. Jubelin, B. Roux, S. Labbé, and F. Baret. 2008. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. Sensors 8:3557–3585. doi:10.3390/s8053557

Liu, T., B. Zhang, Q. Tan, J. Zhou, S. Yu, Q. Zhu, and Y. Bian. 2024. Immersive human-machine teleoperation framework for precision agriculture: Integrating UAV-based digital mapping and virtual reality control. Comput. Electron. Agric. 226:109444. doi:10.1016/j.compag.2024.109444

Martínez, J. S., Y. B. Fernández, P. Leinster, and M. R. Casado. 2020. Combining unmanned aircraft systems and image processing for wastewater treatment plant asset inspection. Remote Sens. 12:1461. doi:10.3390/rs12091461

Marzuki, O. F., E. Y. L. Teo, and A. S. M. Rafie. 2021. The mechanism of drone seeding technology: A review. Malays. For. 84:349–358.

Milella, A., G. Reina, and M. Nielsen. 2019. A multi-sensor robotic platform for ground mapping and estimation beyond the visible spectrum. Precis. Agric. 20:423–444. doi:10.1007/s11119-018-9605-2

Mulla, D. J. 2013. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosyst. Eng. 114:358–371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Ni, T. 2025. Case study: PG&E automates BVLOS compliance with AirData. AirData UAV. https://airdata.com/blog/2025/case-study-pge-automates-bvlos-compliance-with-airdata (visit on 4/30/2025)

Olson, D. and J. Anderson. 2021. Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing, and their applications in agriculture. Agron. J. 113:971–992. doi:10.1002/agj2.20595

Potena, C., R. Khanna, J. Nieto, R. Siegwart, D. Nardi, and A. Pretto. 2019. AgriColMap: Aerial-ground collaborative 3D mapping for precision farming. IEEE Robot. Autom. Lett. 4:1085–1092. doi:10.1109/LRA.2019.2894468

Primicerio, J., S. F. Di Gennaro, E. Fiorillo, L. Genesio, E. Lugato, A. Matese, and F. P. Vaccari. 2012. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. Precis. Agric. 13:517–523. doi:10.1007/s11119-012-9257-6

Qamar, S., S. H. Khan, M. A. Arshad, M. Qamar, and A. Khan. 2022. Autonomous drone swarm navigation

and multi-target tracking in 3D environments with dynamic obstacles. arXiv:2202.06253v1. doi:10.48550/arXiv.2202.06253

Rahman, G., A. U. Rahman, Samiullah, and M. Dawood. 2018. Spatial and temporal variation of rainfall and drought in Khyber Pakhtunkhwa Province of Pakistan during 1971–2015. Arab. J. Geosci. 11:46. doi:10.1007/s12517-018-3396-7

Rejeb, A., A. Abdollahi, K. Rejeb, and H. Treiblmaier. 2022. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. Comput. Electron. Agric. 198:107017. doi:10.1016/j.compag.2022.107017

Sankaran, S., L. R. Khot, C. Z. Espinoza, S. Jarolmasjed, V. R. Sathuvalli, G. J. Vandemark, ... M. J. Pavek. 2015. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. Eur. J. Agron. 70:112–123. doi:10.1016/j.eja.2015.07.004

Sundar, C. B. V., M. Asokhan, and C. Karthikeyan. 2023. Adoption of drones in agriculture: Social, economic and personal factors. Intl. J. Environ. Climate Change 13(8):587–597. doi:10.9734/ijecc/2023/v13i81987

Sylvester, G. (ed.). 2018. E-agriculture in Action: Drones for Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Bangkok, Thailand. 112 pp.

Tripicchio, P., M. Satler, G. Dabisias, E. Ruffaldi, and C. A. Avizzano. 2015. Towards smart farming and sustainable agriculture with drones. p.140–143. *in*: Proceeding of the 2015 International Conference on Intelligent Environments. July 15–17, 2015. Prague, Czech Republic. IEEE Computer Society. Washington, DC. doi:10.1109/IE.2015.29

Varanasi, S. C., B. Meng, C. Alexander, S. Borgyos, and B. Hall. 2022. Automating UAV flight readiness approval using goal-directed answer set programming. arXiv:2208.12199v1. doi:10.48550/arXiv.2208.12199

Vásárhelyi, G., C. Virágh, G. Somorjai, N. Tarcai, T. Szörényi, T. Nepusz, and T. Vicsek. 2014. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots. arXiv:1402.3588v2. doi:10.48550/arXiv.1402.3588

Velusamy, P., S. Rajendran, R. K. Mahendran, S. Naseer, M. Shafiq, and J. G. Choi. 2022. Unmanned aerial vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges. Energies 15:217. doi:10.3390/en15010217

Virágh, C., G. Vásárhelyi, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz, and T. Vicsek. 2013. Flocking algorithm for autonomous flying robots. arXiv:1310.3601v3. doi:10.48550/arXiv.1310.3601

Wang, J., C. Ma, P. Chen, W. Yao, Y. Yan, T. Zeng ... Y. Lan. 2023. Evaluation of aerial spraying application of multi-rotor unmanned aerial vehicle for *Areca catechu* protection. Front. Plant Sci. 14:1093912. doi:10.3389/fpls.2023.1093912

Wang, J., Y. Wang, G. Li, and Z. Qi. 2024. Integration of remote sensing and machine learning for precision agriculture: A comprehensive perspective on applications. Agronomy 14:1975. doi:10.3390/agronomy14091975

Weber, J. 2024. Autonomous drone swarms and the contested imaginaries of artificial intelligence. Digi. War 5:146–149. doi:10.1057/s42984-023-00076-7

Yang, C. M., C. W. Liu, K. Y. Chiu, K. Y. Chen, Y. C. Chen, Y. C. Teng, ... Y. J. Chen. 2022. Comparison of agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) and traditional human labor for biopesticide spraying and fertilization on the effect of organic broccoli production. J. Taiwan Agric. Res. 71:293–307. (in Chinese with English abstract) doi:10.6156/JTAR.202212_71(4).0002

Yang, M. D., Y. C. Hsu, Y. H. Chen, C. Y. Yang, and K. Y. Li. 2025a. Precision monitoring of rice nitrogen fertilizer levels based on machine learning and UAV multispectral imagery. Comput. Electron. Agric. 237:110523. doi:10.1016/j.compag.2025.110523

Yang, M. D., Y. C. Hsu, W. C. Tseng, H. H. Tseng, and M. H. Lai. 2025b. Precision assessment of rice grain moisture content using UAV multispectral imagery and machine learning. Comput. Electron. Agric. 230:109813. doi:10.1016/j.compag.2024.109813

Zarco-Tejada, P. J., N. Hubbard, and P. Loudjani. 2014. Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers- Potential Support with the CAP 2014–2020. Joint Research Centre Scientific and Policy Reports. European Commission. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf (visit on 5/5/2025)

Zhang, C. and J. M. Kovacs. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precis. Agric. 13:693–712. doi:10.1007/s11119-012-9274-5

Zhang, Z., H. Liu, C. Yang, Y. Ampatzidis, J. Zhou, and Y. Jiang. (eds.). 2022. Unmanned Aerial Systems in Precision Agriculture: Technological Progresses and Applications. Springer. Singapore. 136 pp. doi:10.1007/978-981-19-2027-1

Zhou, X., J. Zhu, H. Zhou, C. Xu, and F. Gao. 2020. EGO-Swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments. arXiv:2011.04183v3. doi:10.48550/arXiv.2011.04183

Agricultural Drones, a Modern Tool for Agricultural Multi-Applications and Future Perspectives

Yi-Jing Chen[1] and Chwen-Ming Yang[2,*]

Abstract

Chen, Y. J. and C. M. Yang. 2026. Agricultural drones, a modern tool for agricultural multi-applications and future perspectives. J. Taiwan Agric. Res. 75(1):73–85.

The renewal of farming concepts and the advancement of technologies have driven the improvement and innovation of agricultural management. From food production, agricultural product marketing, to agricultural environmental protection and ecological maintenance, the thinking and practices are progressing with the pulse of the times. It is hoped that human beings can live a happy life with enough food supply, and that people can live a bright and colorful life. Agricultural drones have emerged at this time, not only at the forefront of the current agricultural industry, but also becoming an aerial artificial intelligence helper for the future development of agriculture. They have evolved from a single operating tool to an agricultural information/data platform, an adversity/disaster detection (monitoring) eye and ear, an epidemic prevention and disaster prevention and rescue hub, and even a multi-functional tool for agricultural net zero and carbon management. The introduction and utilization of agricultural drones in Taiwan's farming system has gradually evolved from the early spraying and fertilizing of rice cultivation to a variety of applications. It is expected that, in the future, various sensing devices, advanced technologies, artificial intelligence, the Internet of Things, and customized operating systems can be combined to be widely used to further improve the quality of agricultural and food production, the efficiency of agricultural management, and a tool to cope with climate change and agricultural net zero. With that, it can provide data-based, multi-target, high-efficiency, low-risk, and multi-featured solutions to contribute to the realization of the vision of sustainable agriculture. This article integrates relevant information and scenarios to describe the advantages and challenges of agricultural drones. In view of the future, it hopes that agricultural practitioners will be far-sighted and insightful about opportunities, and agricultural stakeholders will find niches for industry development, and work together for mutual benefit and win-win results to usher in a new era of agriculture.

Key words: Drones, Agricultural drones, Agricultural applications, Precision agriculture, Smart agriculture.

Received: July 4, 2025; Accepted: November 27, 2025.
[*] Corresponding author, e-mail: cmyang0616@gmail.com
[1] Project Assistant, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[2] Former Research Fellow and Division Director, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.